第30卷 第4期 材 料 研 究 学 报 Vol. 30 No. 4
2016年4月 CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH April 2016

Fe对Ti-6Al-4V ELI合金力学性能的影响

梁恩泉[1] 黄森森[2,3] 马英杰[3] 张 韧[1] 雷家峰[3] 柳 洋[1]

1. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院 上海 200232
2. 东北大学材料科学与工程学院 沈阳 110819
3. 中国科学院金属研究所 沈阳 110016

摘 要 研究了Fe含量(0.03%-0.24%, 质量分数)对Ti-6Al-4V ELI (TC4 ELI) 合金力学性能的影响。利用EBSD对合金显微组织进行了表征, 对3种不同Fe含量的TC4 ELI的拉伸性能、断裂韧性和疲劳裂纹扩展速率(d*a*/d*N*)、蠕变性能进行了对比分析。结果表明: 随着Fe含量增加, 在保持断裂韧性不变的同时, TC4 ELI合金的抗拉强度获得提高; 3种Fe含量的TC4 ELI合金在室温和200℃时的疲劳裂纹扩展速率相当, 而400℃条件下提高Fe含量将增大d*a*/d*N*; 低于350℃时, 提高Fe含量能够增强合金的抗蠕变能力, 而高于350℃时, Fe的作用相反。分析可知: 微量Fe在*β*相内富集, 具有固溶强化作用, 从而提高了合金的抗拉强度; 高于350℃时, Fe具有加速扩散作用, 加速了基体内原子和界面的运动, 导致裂纹尖端塑性区内位错运动阻力降低, 从而提高了d*a*/d*N*, 并且Fe加快了位错攀移的过程, 提高蠕变速率, 而低于350℃条件下, 扩散运动减弱, Fe主要起到强化作用。

关键词 金属材料, Ti-6Al-4V ELI, 铁含量, 断裂韧性, 疲劳裂纹扩展, 蠕变

分类号 TG146 文章编号 1005-3093(2016)04-0299-08

The Influence of Fe on the Mechanical Properties of Ti-6Al-4V ELI Alloy

LIANG Enquan[1] HUANG Sensen[2,3] MA Yingjie[3*] ZHANG Ren[1] LEI Jiafeng[3] LIU Yang[1]

1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd, Shanghai 200232, China

2. Institute of Material and Metallurgy, Northeast University, Shenyang 110819, China

3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Manuscript received June 24, 2015; in revised form August 13, 2015.

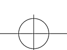
*To whom correspondence should be addressed, Tel: 13840026329, E-mail: yjma@imr.ac.cn

ABSTRACT The effect of different Fe contents (0.03%, 0.17%, 0.24%) on the mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI (TC4 ELI) alloy was studied. The microstructures were characterize by using EBSD, and the tensile properties, fracture toughness and fatigue crack growth rates (d*a*/d*N*), creep properties of TC4 ELI with three Fe contents were compared and analyzed. The results showed that with the increase of Fe contents, Fe has no apparent influence on fracture toughness, however, tensile strength of the alloy was improved. The d*a*/d*N* of the three TC4 ELI alloys were found to be almost identical at room temperature and 200℃, however d*a*/d*N* was found to be marginally faster as Fe contents increased at 400℃. Within the range of 250~350℃, Fe improved creep resistance, while from 350℃ to 400℃, Fe had opposite effect. Fe atom was mainly enriched in β phase. And the tensile strength was improved with the increase of Fe contents due to the solid solution strengthening effect. Because of the high diffusing rates of Fe atom under the condition of 400℃, the movement of matrix atoms and interfaces were accelerated. So that, the resistance to dislocation motion in crack tip plastic zone was reduced, which led to higher d*a*/d*N*. Under the condition of 350-400℃, Fe could improve the creep rate by speeding up the process of dislocation climbing, but the reinforcement is more important below 350℃ because of the weak diffusion.

KEY WORDS metallic materials, Ti-6Al-4V ELI, Fe content, fracture toughness, fatigue crack growth, creep

Ti-6Al-4V ELI是一种中等强度损伤容限型钛合金, 具有较高的断裂韧性及较低的疲劳裂纹扩展速率(d*a*/d*N*), 广泛应用于航空航天领域[1,2]。目前针

2015年6月24日收到初稿; 2015年8月13日收到修改稿。
本文联系人: 马英杰
DOI: 10.11901/1005.3093.2015.353



对热加工工艺及热处理制度对TC4 ELI显微组织和力学性能的影响已有大量研究。王新南等人[3]提出了准β锻造工艺，有效地降低了合金疲劳裂纹扩展速率。PENG等人[4]研究了热机械处理后TC4-DT的显微组织特征和力学性能，结果表明双重退火制度使合金获得良好的强度和塑性匹配。除合金主元素外，杂质元素尤其是Fe和O对钛合金的力学性能具有明显影响[5-7]，实践表明，通过对传统钛合金的成分进行微量调整来实现材料损伤容限性能的进一步提升，是一种经济、有效的技术措施。航空用TC4合金的Fe含量已有相关材料标准(质量分数不超过0.25%)，根据使用温度不同，TC4合金中的Fe含量均在标准范围内进行调整。400℃以上使用的高温钛合金中，Fe含量受到严格限制，这是由于即便微量Fe对高温蠕变、疲劳性能也有显著不利影响。而针对400℃以下使用的钛合金，目前对于Fe含量在标准上、下限的控制并不明确，特别是使用温度在100−300℃时，是否严格限制Fe含量并未有研究结论。本文通过调整TC4 ELI合金中Fe的含量，分析微量Fe含量的变化对其性能特别是蠕变性能的影响，为不同使用温度的TC4合金的成分设计提供参考。

1 实验方法

实验所用材料为TC4 ELI钛合金，化学成分见表1。3种成分(0.03%, 0.17%, 0.24%，质量分数，分别记为样品No1, No2, No3)的TC4 ELI合金均经过β相区热处理，热处理制度为：1000℃/1.5 h/A.C.+730℃/3 h/A.C.。在HF∶HNO_3∶H_2O=1∶3∶10的溶液中腐蚀试样，用JSM-6301F扫描电镜(SEM)观察试样显微组织。

利用S-3400N扫描电镜观察3种Fe含量TC4 ELI合金的显微组织形貌，并结合能谱半定量分析Fe、Al、V 3种元素中在α、β相中的含量分布。利用电子背散射衍射(EBSD)技术表征TC4 ELI合金的晶粒内部α集束的取向关系。利用INSTRON 5582电子万能试验机和MTS810疲劳试验机分别测试合金的室温和高温拉伸性能、断裂韧度以及室温、200℃、400℃的疲劳裂纹扩展速率。利用高温蠕变试验机进行蠕变测试，全部实验过程均由计算机自动控制完成。

2 结果与讨论

2.1 晶体取向分析

3种Fe含量的TC4 ELI合金显微组织如图1所示。通过β相区热处理获得了具有原始β晶粒的片层组织，原始β晶粒平均尺寸约为500 μm，相邻α片层宽度约为2 μm，微量元素Fe含量的变化没有导致显微组织的明显变化。利用EBSD分析获得了No3合金试样的晶体取向图和集束角度取向差统计图。从图2可以看出：晶粒内部同一集束晶体取向一致，多数沿α相的(0001)方向，相邻集束和晶粒间取向有差异。对图2中α集束角度差统计，结果见图3。可以看出，测试样品中主要为1°−10°的小角度界面，存在于α集束内部，少数为60°−70°大角度界面，存在于集束之间和相邻晶粒间。

2.2 元素浓度分布

3种TC4 ELI合金中Al、V和Fe在α、β相中的元素分布如图4所示。可以看出：3种合金不同相之内的元素含量均与表1中的化学成分存在差异，即3种合金内均存在元素的富集现象。具体表现为在α相中V元素含量降低，Fe元素浓度变化不大，而β相中Fe元素和V元素含量明显升高，Al元素在两相中比例差异不大。图5线扫描结果表明，Fe含量在β相内有极大值，说明Fe在β相内和α/β相界处富集。统计3种Fe含量样品的不同元素在不同相中的平均浓度，见表2。可以看出，V、Fe元素在α、β两相中比例不同，二者均在β相中富集，并且Fe元素的富集程度明显大于V元素。

2.3 拉伸性能和断裂韧性

图6为3种合金在不同实验温度下的抗拉强度。可以看出，No3合金试样的抗拉强度较No1合金试样提高50 MPa左右，说明Fe具有较强的强化效果。元素对钛合金起强化作用的一个主要原因是合

表1 3种Fe含量TC4ELI合金的化学成分

Table 1 The chemical compositions of three TC4ELI samples with different Fe contents (%, mass fraction)

Sample	Impurity					Alloying element		
	Fe	C	N	H	O	Al	V	Ti
No1	0.03	<0.01	<0.01	<0.001	0.06	6.00	4.14	Bal.
No2	0.17	<0.01	<0.01	<0.001	0.06	6.00	4.15	Bal.
No3	0.24	<0.01	<0.01	<0.001	0.06	5.99	4.14	Bal.

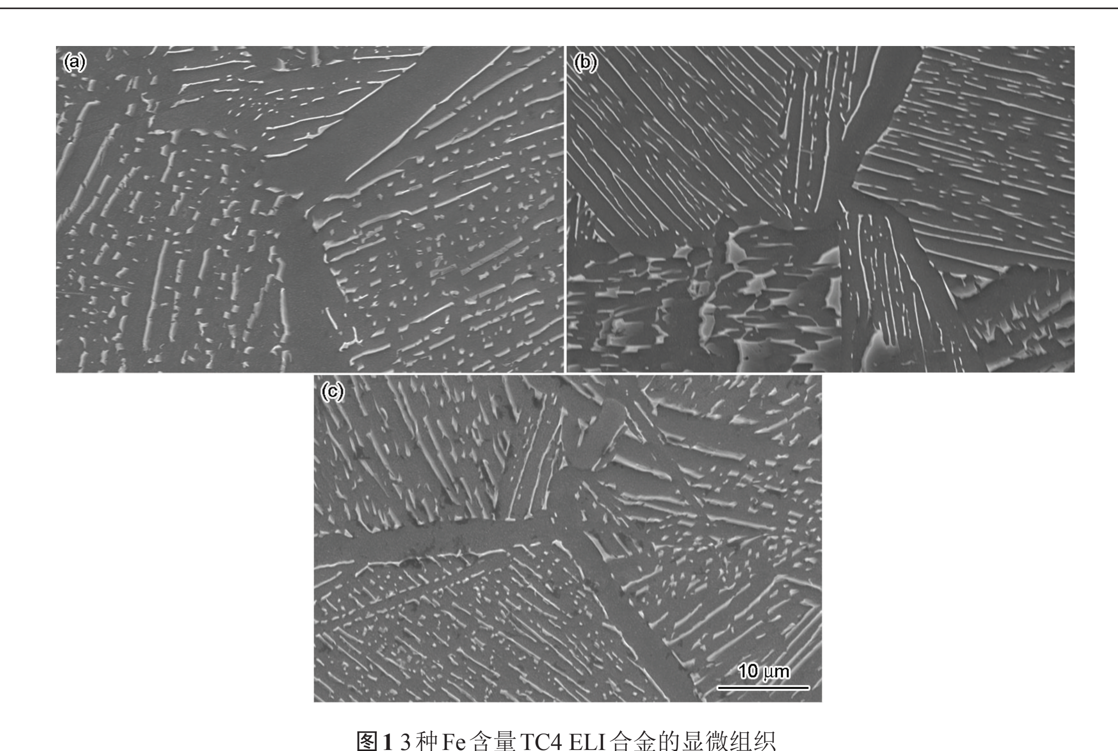


图1 3种Fe含量TC4 ELI合金的显微组织

Fig.1 Microstructures of three TC4 ELI alloys with different Fe contents, (a) No1, (b) No2, (c) No3

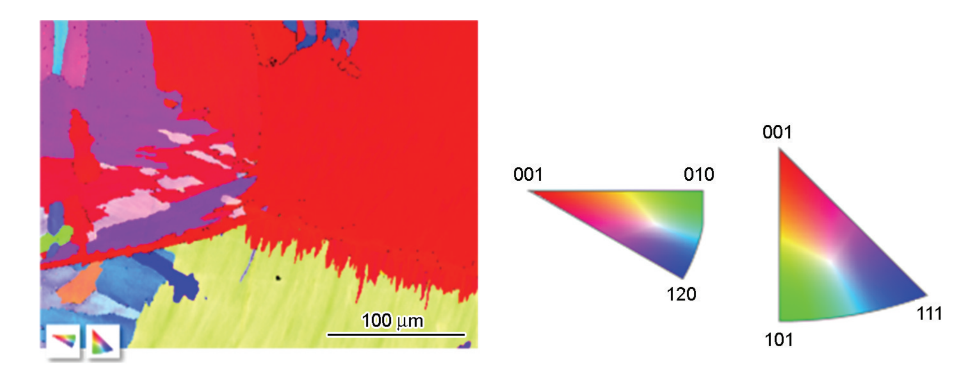


图2 No3合金样品的晶体取向分布图

Fig.2 Crystal orientation distribution of No3 alloy

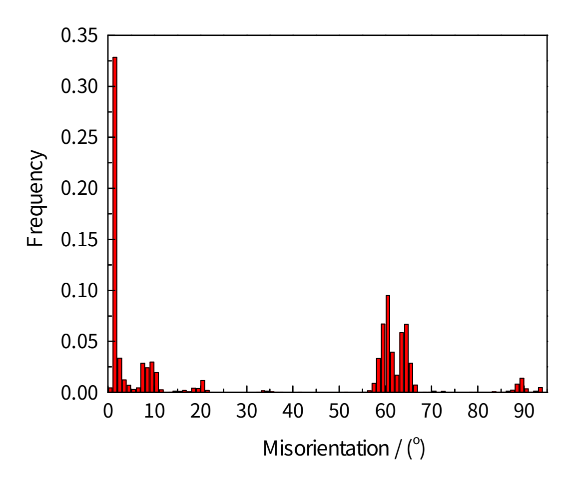


图3 No3合金样品集束角度统计分布

Fig.3 Statistical distribution of colony boundaries of No3 alloy

金元素与Ti原子之间存在着原子半径、弹性模量及原子价等方面的差异[6]。Ti的原子半径为0.147 nm, Fe原子半径为0.127 nm, Fe与Ti的原子半径比等于0.86[8], Fe的原子价 n=8, Ti的原子价 n=4, 二者原子价之差为4, 弹性模量之差98000 MPa。综合来看Fe原子与Ti原子之间存在较大的原子半径差和原子价差, 因而微量Fe的添加对TC4 ELI合金起到了明显的固溶强化作用。文献[5, 6]都指出了Fe元素对钛合金中 α 相的强化作用, 本文研究发现Fe主要在TC4 ELI合金的 β 相中富集, 说明Fe对合金的影响主要来源于Fe对合金中 β 相和 α/β 界面的强化作用。Fe固溶于TC4 ELI合金的 β 相内, Fe与Ti之间总弹性模量的差异使得基体晶格畸变能增加, 提高了开动位错源所需的外力。同时由于溶质原子Fe容易偏聚, 晶粒内部和界面处易于形成溶质原子气团(柯氏气团), 强烈阻碍了可动位错的滑移过程, 导致其抗拉强度提高。

表3为3种Fe含量的试样在室温下的断裂韧度

图4 Al、V、Fe元素在α/β两相内的含量

Fig.4 The content of Al, V, Fe in α/β phases of three TC4 ELI alloys, (a) No1 α phase, (b) No1 β phase, (c) No2 α phase, (d) No2 β phase, (e) No3 α phase, (f) No3 β phase

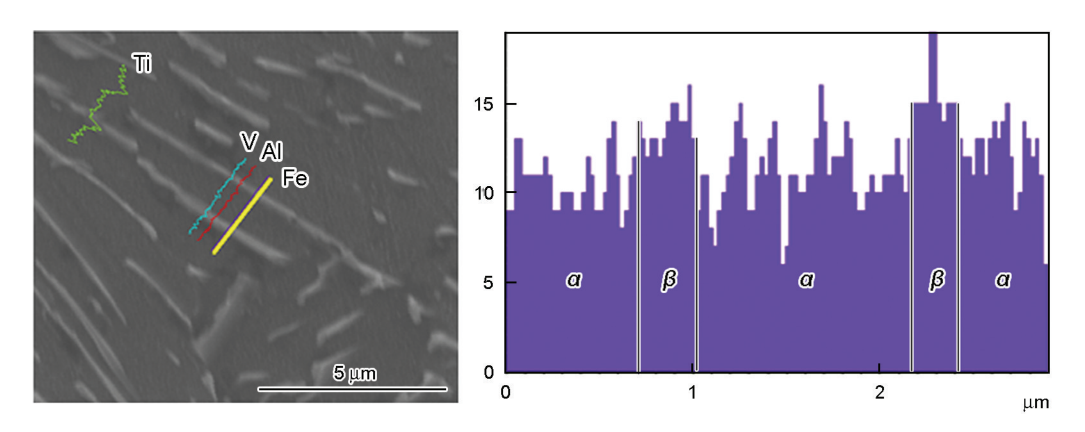


图5 No3合金样品中Fe元素浓度线分布

Fig.5 Line distribution of Fe content of No3 alloy

表2 3种Fe含量TC4ELI合金α/β两相中不同元素含量

Table 2 Elements content in α/β phases of of TC4 ELI alloys with different Fe contents (%, mass fraction)

Sample	Al		V		Fe	
	α	β	α	β	α	β
No1	6.12	6.27	3.00	6.08	0.06	0.16
No2	6.31	6.47	3.71	5.91	0.23	0.58
No3	6.38	5.92	3.13	8.03	0.16	1.09

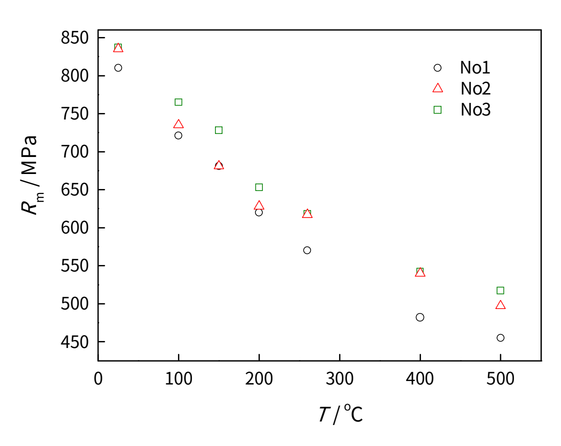


图6 3种TC4ELI合金在不同实验温度下的拉伸强度

Fig.6 Tensile strength of TC4ELI alloys with different Fe contents at different temperatures

表3 3种Fe含量TC4ELI合金的断裂韧性

Table 3 Fracture toughness of TC4ELI alloys with different Fe contents

Sample	P_Q/ kN	P_{max}/ kN	K_q/ MPa·m$^{1/2}$
No1	66.6	72.4	116.3
No2	65.8	71.3	115.1
No3	66.1	71.3	115.5

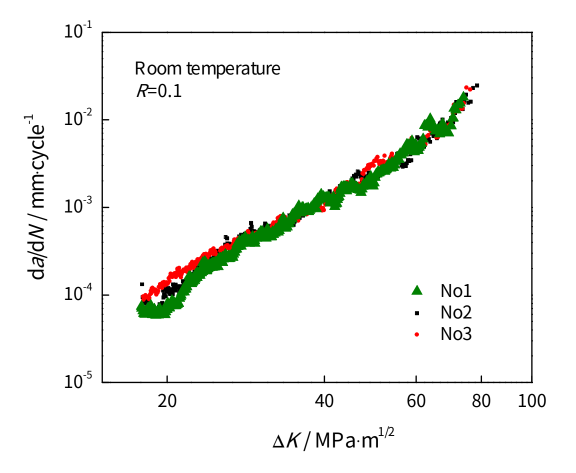


图7 室温下3种TC4 ELI合金的疲劳裂纹扩展速率

Fig.7 da/dN curves of TC4ELI alloys with different Fe contents at room temperature

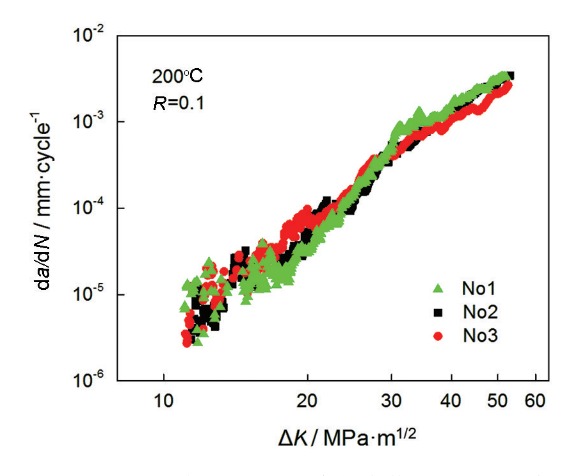


图8 200℃下3种TC4 ELI合金的疲劳裂纹扩展速率

Fig.8 da/dN curves of TC4ELI alloys with different Fe contents at 200℃

值, 可以看出, 微量Fe含量的调整对TC4 ELI的断裂韧性影响不大。分析可知, 在相同环境、固定应力比和频率条件下, 合金的断裂性能与显微组织密切相关, 而结合图1可以看出微量Fe的变化没有导致合金显微组织的明显变化, 三者均为典型的钛合金片层组织, 其原始β晶粒尺寸、α集束尺寸, α片层间距等没有明显变化。相同的显微组织导致了相同的变形和断裂机制, 因此3种TC4 ELI合金的断裂韧性值几乎一致。结合图6和表3可知, 当Fe含量为0.17%~0.24%时, 能够获得较好的强度韧性匹配。

2.4 疲劳裂纹扩展速率

疲劳裂纹扩展速率反映了材料抵抗裂纹扩展的能力, 是现代材料研究中的重要内容之一。图7~9为3种Fe含量的试样在不同实验温度下的裂纹扩展速率, 可以看出在室温和200℃下, 微量Fe含量的变化对疲劳裂纹扩展速率没有影响。而在400℃下, 虽然由于合金自身和高温测试方法的原因导致裂纹扩展速率数据比较分散[9], 但仍可以明显看出Fe含量为0.24%的试样裂纹扩展速率最快。

吴欢等人[10]指出, 环境变化、应力条件、加载频率等对金属材料的疲劳裂纹扩展影响最大, 另外杂质元素和疲劳裂纹扩展行为[11]紧密相关。本文3种Fe含量的TC4 ELI试样实验的外部因素相同, 而且显微形貌相近, 因此三者的裂纹扩展行为相似, 扩展速率应差别不大。图10为三者在400℃条件下的疲劳裂纹扩展断口形貌, 可以看出3个试样均呈现典

型的解理断裂形貌, 其中存在较多的解理小平面、台阶和河流花样。然而, 之所以在400℃下, 0.24% Fe的合金裂纹扩展速率最快, 与Fe的扩散行为有关。温度较高时, 原子热运动剧烈, Fe的扩散行为对TC4 ELI合金的力学性能产生了一定影响。高温下Fe是在钛合金中具有反常快的扩散行为[8, 12], 其扩散速率远远大于空位扩散机制, 但小于间隙扩散机制, 说明Fe原子在α-Ti中不全是作为置换元素存在。Frank[8]指出部分Fe原子以间隙原子方式存在, 能够进行间隙扩散, 这可能与Ti的反常大的离子/原子半径比有关。这种间隙扩散机制使得Fe原子的扩散速率远远大于Ti原子: 600℃时, Fe在α-Ti中的扩散

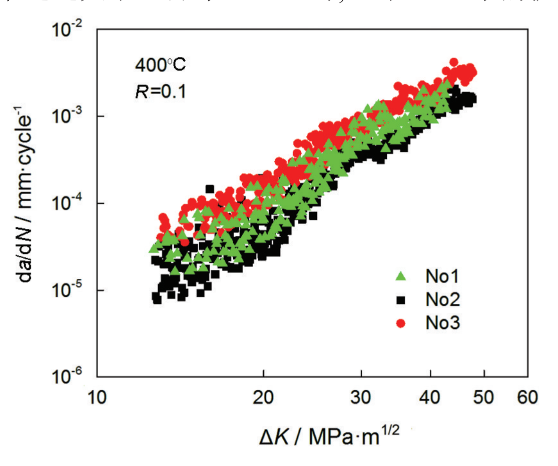


图9 400℃下3种Fe含量TC4 ELI合金的疲劳裂纹扩展速率

Fig.9 da/dN curves of TC4ELI alloys with different Fe content at 400℃

系数为10^{-13} m²/s, 而α-Ti自扩散系数仅为10^{-20} m²/s[13]。此外, Fe原子能显著提高基体α-Ti的自扩散、Al原子和间隙O原子在α-Ti中的扩散速率, 导致裂纹扩展过程位错运动的晶格阻力降低, 裂纹尖端区域的位错不容易缠结形成稳定结构, 因而裂纹尖端每循环生长距离增大, 裂纹扩展速率加快。同时晶界处由于原子的快速扩散, 晶界迁移速率增大, 晶界结合强度降低, 易于开裂, 也导致裂纹扩展速率明显加快。

2.5 抗蠕变性能

图11为不同试验温度下No1和No3 TC4 ELI钛合金的蠕变曲线。实验主要对TC4 ELI钛合金服役温度范围内的蠕变性能进行研究, 采用固定蠕变应力的方法, 观察应变随时间的变化, 蠕变时间均设定为100 h。

对比两合金蠕变曲线的差异, 可以看出400℃时, No1合金的抗蠕变能力强于No3合金, 而在350℃、300℃及250℃下No3合金的抗蠕变能力强于No1合金。由此说明在400℃及以上温度时, Fe的加入对TC4 ELI合金的高温蠕变性能起到损害作用; 在350℃及以下温度时, Fe的加入对TC4 ELI合金的高温蠕变性能起到增强作用。Fe元素对TC4 ELI合金的抗蠕变性能的影响存在温度转折点, 由图11可以推测, 此转变温度为350℃左右。

对250-400℃条件下求取两合金的蠕变应力指数如图12所示, 得到的蠕变应力指数在3.4-6.7之

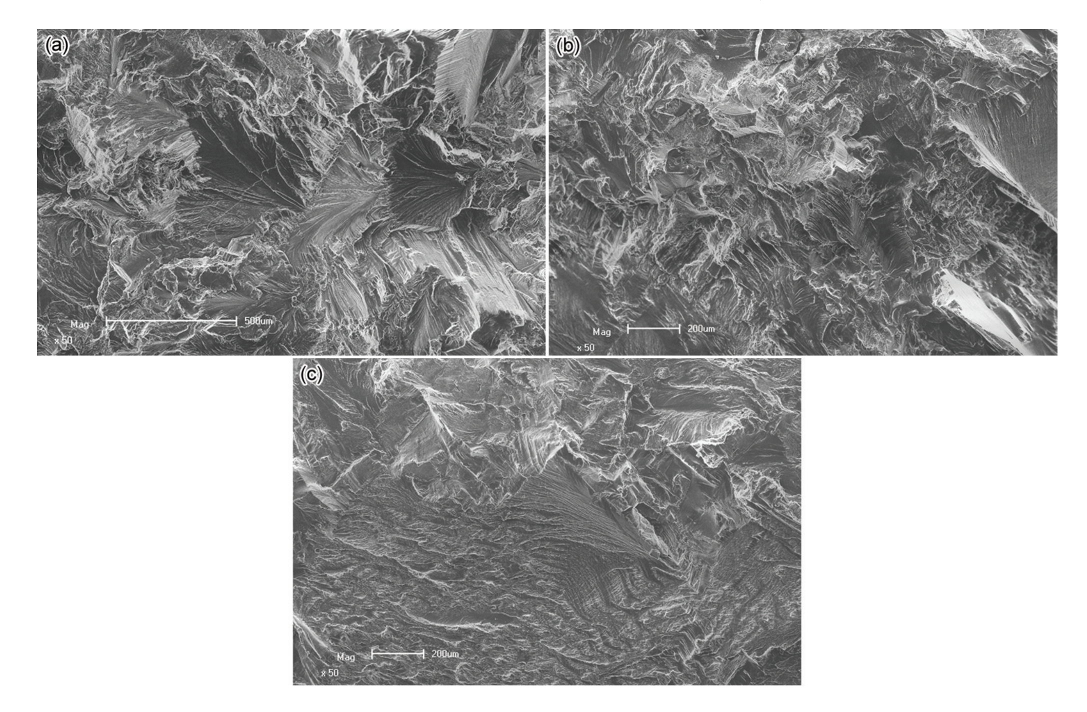


图10 3种Fe含量TC4 ELI合金在400℃下的裂纹扩展试样断口形貌

Fig.10 Fracture morphology of crack propagation of TC4ELI alloys with different Fe contents at 400℃ (a) No1, (b) No2, (c) No3

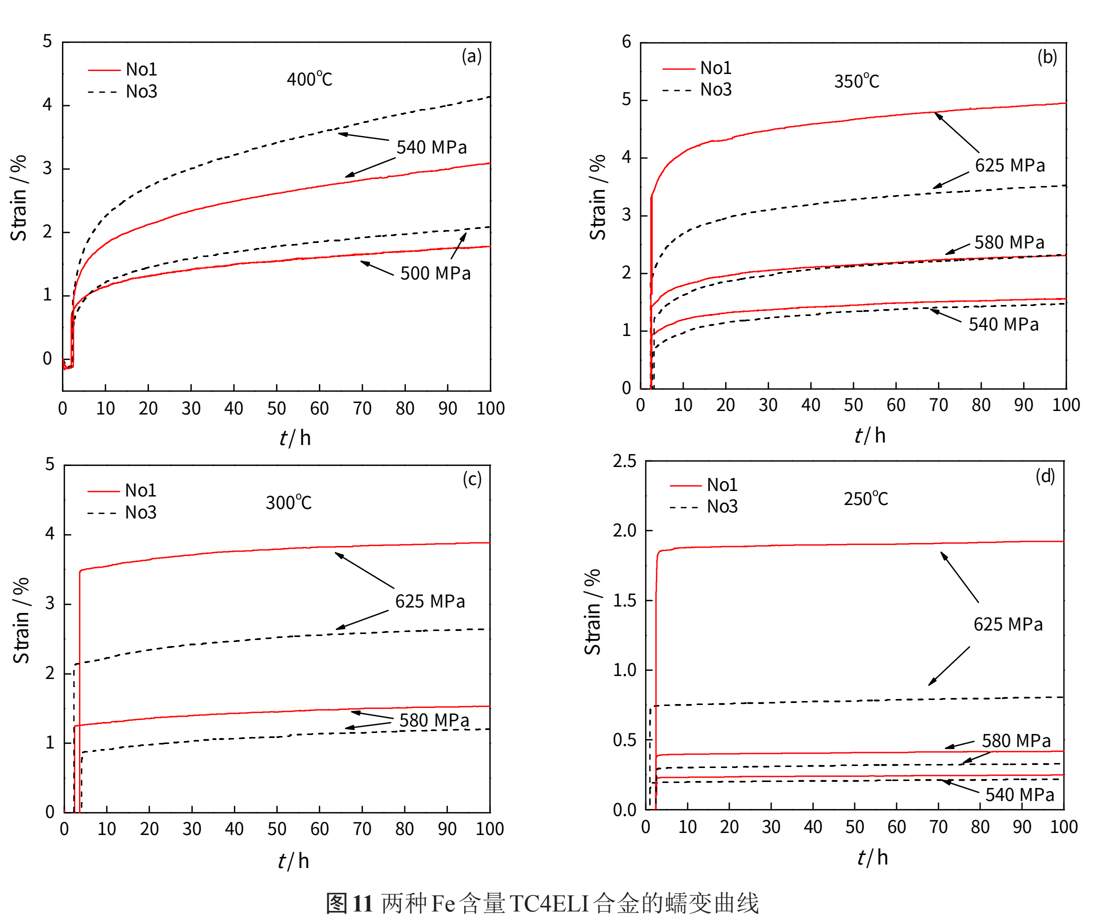


图 11 两种Fe含量TC4ELI合金的蠕变曲线

Fig.11 Creep curves of No1 and No3 TC4 ELI alloys, (a) 400ºC, (b) 350ºC, (c) 300ºC, (d) 250ºC

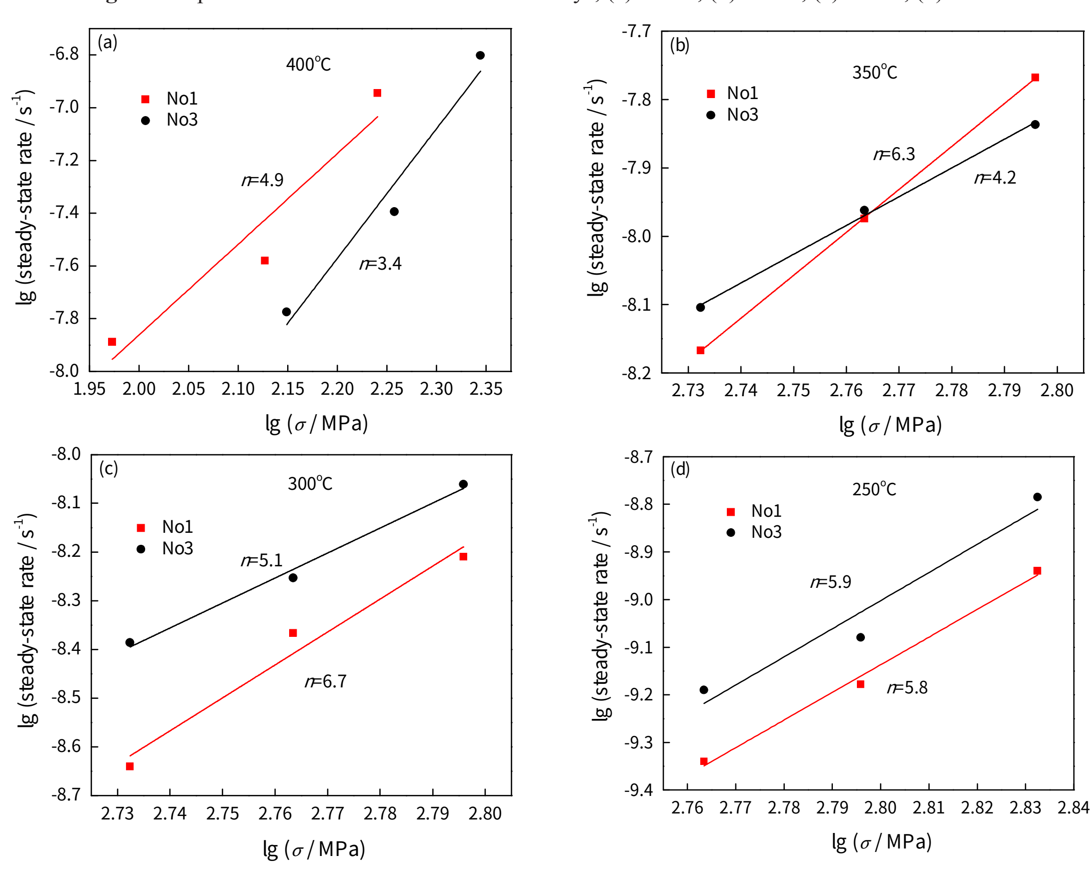


图 12 两种Fe含量TC4 ELI合金的蠕变应力指数

Fig.12 Creep stress exponents of No1 and No3 TC4 ELI alloys at different temperatures, (a) 400ºC, (b) 350ºC, (c) 300ºC, (d) 250ºC



间, 表明在250-350℃范围内No1与No3合金的蠕变机制为位错攀移蠕变机制。分析可知, 在250℃以上温度变形时, 需要考虑原子扩散作用的影响。Fe的加入能够显著提高α-Ti内原子的扩散速率, 加快蠕变过程中位错的攀移速率, 降低蠕变激活能, 从而导致TA15合金蠕变性能的下降。在250℃以下时, 由于扩散作用影响很小, 所以Fe的加入对原子的运动速率没有明显影响。反而, 由于温度较低条件下, 蠕变过程主要依靠位错的滑移等变形机制, 添加的Fe元素成为位错运动的障碍, 从而对TC4 ELI合金的抗蠕变性能起到了强化效果。

3 结 论

1. 微量Fe含量调整(0.03%, 0.17%, 0.24%)对TC4 ELI钛合金的拉伸强度有一定影响, 这是由于Fe的偏聚具有明显固溶强化的作用, 但微调Fe含量对断裂韧性的基本无影响。

2. 室温、200℃实验条件下, 微调Fe含量基本不会对合金的疲劳裂纹扩展速率产生影响, 但400℃实验条件下, 由于Fe的快速扩散行为, 加速了裂纹尖端塑性区内位错的运动, 导致0.24%Fe的合金裂纹扩展速率最高。

3. 350℃及以下实验温度条件下, 提高Fe含量能够提升合金的抗蠕变性能, 而400℃温度条件下, 在0.04%-0.24%范围内提升Fe含量也能够显著降低合金的抗蠕变性能。

参 考 文 献

1 WANG Xin, LEI Jiafeng, MA Yingjie, LI Xiaoyan, WANG Jian, WANG Hongwu, Influence of heat-treatment on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V ELI plate, China Titanium Industry, (4), 23(2011)
(王 新, 雷家峰, 马英杰, 李晓艳, 王 俭, 王红武, 热处理对Ti-6Al-4V ELI钛合金厚板显微组织和力学性能的影响, 中国钛业, (4), 23(2011))

2 ZHU Zhishou, MA Shaojun, WANG Xinnan, TONG Lu, WU Xueren, ZHAO Yongqing, QU Henglei, Study on fatigue crack propagation rate of TC4-DT damage tolerance titanium alloy, Titanium Industry Progress, **22**(6), 10(2005)
(朱知寿, 马少俊, 王新南, 童 路, 吴学仁, 赵永庆, 曲恒磊, TC4-DT损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展特性的研究, 钛工业进展, **22**(6), 10(2005))

3 WANG Xinnan, ZHU Zhishou, TONG Lu, ZHOU Yu, ZHOU Xiaohu, YU Hanqing, The influence of forging processing on fatigue crack propagation rate of damage-tolerant titanium alloy, Rare Metals Letters, **27**(7), 12(2008)
(王新南, 朱知寿, 童 路, 周 宇, 周晓虎, 俞汉清, 锻造工艺对TC4-DT和TC21损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响, 稀有金属快报, **27**(7), 12(2008))

4 Xiao-na PENG, Hong-zhen GUO, Zhi-feng SHI, Chun QIN, Zhang-long ZHAO, Microstructure characterization and mechanical properties of TC4-DT titanium alloy after thermomechanical treatment, Transactions of Nonferrous Metals, Society, of China, (24), 682 (2014)

5 FANG Yajun, CAO Jimin, YANG Huabin, CHEN Zhihong, LI Lei, Effect of Fe content on mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy, Heat Treatment of Metals, **38**(3), 21(2013)
(樊亚军, 曹继敏, 杨华斌, 陈志宏, 李 雷, Fe含量对Ti-6Al-4V钛合金力学性能的影响, 金属热处理, **38**(3), 21(2013))

6 WU Huan, ZHAO Yongqing, GE Peng, ZHOU Wei, Effect of β stabilizing elements on the strengthening behavior of titanium α phase, Rare Metal Materials and Engineering, **41**(5), 805(2012)
(吴 欢, 赵永庆, 葛 鹏, 周 伟, β稳定元素对钛合金α相强化行为的影响, 稀有金属材料与工程, **41**(5), 805(2012))

7 LIAN Caihao, YANG Sheng, ZHOU Hui, TANG Renbo, LI Dan, Effect of alloying element (Nb, Ta, Fe and Zr) on microstructure and mechanical properties of biomedical titanium alloy, Hot Working Technology, **42**(14), 40(2013)
(廉才浩, 杨 胜, 周 慧, 唐仁波, 李 丹, 合金元素Nb, Ta, Fe, Zr对钛合金组织和性能的影响, 热加工工艺, **42**(14), 40(2013))

8 CAI Jianming, MA Jimin, HUANG Xu, CAO Chunxiao, Diffusion behavior of impurity iron in high temperature titanium alloys and its detrimental effect on creep resistance, Journal of Materials Engineering, (8), 84(2009)
(蔡建明, 马济民, 黄 旭, 曹春晓, 高温钛合金中杂质元素Fe的扩散行为及其对蠕变抗力的损害作用, 材料工程, (8), 84(2009))

9 HUANG Xinyue, ZHANG Shichao, LU Yuan, YU Huichen, Investigation on fatigue crack propagation behavior of TC11 and TC4 Ti alloys at room temperature and 400℃, Journal of Aeronautical Materials, **31**(5), 82(2011)
(黄新跃, 张仕朝, 鲁 原, 于慧臣, TC11和TC4钛合金室温/400℃疲劳裂纹扩展特性研究, 航空材料学报, **31**(5), 82(2011))

10 WU Huan, ZHAO Yongqing, ZENG Weidong, State for fatigue crack propagation behavior and character of titanium alloy, Rare Metals Letters, **26**(7), 1(2007)
(吴 欢, 赵永庆, 曾卫东, 疲劳裂纹扩展行为的研究现状及钛合金的疲劳裂纹扩展特征, 稀有金属快报, **26**(7), 1(2007))

11 LIU Pengtao, ZHAO Xiujuan, LIU Xin, QI Jian, CHEN Chunhuan, WANG Yajun, REN Ruiming, Effects of hydrogen on fatigue crack propagation rate of TC4 alloy electron beam welded joint, Journal of Aeronautical Materials, **31**(3), 52(2011)
(刘鹏涛, 赵秀娟, 刘 昕, 齐 健, 陈春焕, 王亚军, 任瑞铭, 氢对TC4钛合金电子束焊接头疲劳裂纹扩展速率的影响, 航空材料学报, **31**(3), 52(2011))

12 Y. Mishin, Chr. Herzig, Diffusion in the Ti-Al System, Acta materialia, **48**(3), 589(2000)

13 Gerd Lütjering, *Titanium*, (Germany, Springer, 2007) p.45-46

